

氏 名	中岡 健一
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	第 6 1 9 4 号
授 与 報 告 番 号	（甲）第 3 4 9 0 号
学位授与年月日	平成 2 7 年 9 月 3 0 日
学位授与の要件	学位規則第 3 条第 1 項
学 位 論 文 名	地山強度の低い山岳トンネルの掘削において生じるひずみ軟化現象に対する 数値解析手法の研究
論文審査委員	主 査 教 授 鬼頭 宏明 副主査 教 授 大島 昭彦 副主査 教 授 山口 隆司

論 文 内 容 の 要 旨

山岳トンネルの掘削時に、当初設計よりも強度が低い地山に遭遇した場合、トンネル周辺地盤に、ひずみ軟化現象を伴うせん断帯や膨張性が生じることがあり、補助工法や支保工の設計を速やかに行う必要がある。本論文は、このような現象を適切に評価する数値解析手法の提案を試みたものであり、5章から構成した。各章の内容を以下に要約する。

まず、第1章では、本論文の対象である山岳トンネル、すなわち、山岳工法(NATM)によるトンネル掘削施工の特徴を説明すると共に、その際、冒頭に示したように地山強度が低い場合に発生する、ひずみ軟化現象について、その事例や既往の研究例について紹介した。それに基づき、適切なトンネル掘削施工を行うためには、トンネルの形状と地山材料の特性から、ひずみ軟化現象、さらには、その時間依存性を評価できる三次元数値解析手法が必要とされていることを示した。

第2章では、トンネル掘削時において生じる、地山のひずみ軟化に伴い、せん断帯がトンネルから上方に伸長する現象を、切羽においても評価できるようにするため、芥川らによる、損傷理論に基づき、地山のせん断特性を修正する二次元問題での手法を、三次元問題に拡張する手法を提案した。そして、提案した手法により、トンネル断面と切羽をモデル化した既往の遠心載荷実験を対象に、数値解析を行い、その妥当性を確認した。また、模型実験における鏡ボルトの効果も適切に評価されており、支保工の設計に十分に適用できることを示した。

第3章では、Lade(1977)による砂質土を対象としたひずみ硬化・軟化を一連で評価する、ひずみ空間にて記述される弾塑性構成則に、ここで対象とするトンネル地山の特性である粘着力を導入できるように拡張した構成則を提案した。そして、提案した構成則を導入した数値解析手法により、第2章と同様な既往の実験に対する数値解析を行い、第2章で提案した数値解析手法による結果との比較検討を行い、その妥当性を確認した。

第4章では、トンネル壁面の変位が時間とともに大きくなり続ける、膨張性の兆候が表れた場合に着目した。そのために、第2,3章とは異なり、地山のクリープ破壊まで評価できる、微小亀裂の伸長度とそれに働く応力の偏差成分の関係に立脚した、時間依存型の数値解析手法を提案した。そして、提案した手法により、既往の三軸載荷試験に対する数値解析を行い、その妥当性を確認した。さらに、実構造物を想定したトンネルモデルの解析も行い、時間とともに伸長するせん断帯の発生・伸長を良好に評価できることを検証した。

最後に、第5章では、本研究で得られた成果をとりまとめると共に、今後の課題を提示した。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

山岳トンネルとは、山岳工法(NATM: New Austrian Tunneling Method)にて施工されたトンネルを指す。この工法は地山強度を期待し掘削後の支保工を設計するため、当初の設計より地山強度が低い場合、トンネル周辺地盤が、ひずみ軟化現象を呈し、掘削先端面(切羽)にてすべり変形(せん断帯)が発生・進展することや、経時的に掘削面が膨張変形することがある。その対策に数値解析手法を援

用する試みもあるものの、主として掘削地盤の圧縮強度や掘削断面の形状変化の計測などによる経験的な施工管理が行われているのが現状である。すなわち、適切かつ円滑なトンネル掘削施工を行うためには、トンネルの立体的な形状と、地山の非線形かつ時間依存性を有する材料特性を考慮した、三次元数値解析手法が必要とされている。

本論文では、まず、ひずみ軟化現象により生じる切羽でのせん断帯の発生・進展を評価するために、地山のせん断剛性を逐次修正する、既往の二次元解析手法を、三次元問題に拡張し有限要素解析に定式化する手法を提案している。そして、トンネル断面と切羽をモデル化した、粘性改良土を用いた遠心力载荷実験や砂質土模型実験の結果を対象に、その手法を適用し、実験で観察された切羽でのすべり変形量やせん断帯の発生・進展を良好に表現できることを示している。加えて、古典的な弾塑性論に基づき、ひずみ軟化現象を考慮できる既往の材料構成則を用いて、同様に三次元有限要素解析に定式化する手法を示し、上記実験結果との比較を通して、その妥当性を検証している。結果として、ここで提案した両手法は根幹的な材料特性のモデル化は異なるものの、いずれの手法もひずみ軟化現象を適切に評価できる手法であることを示している。

一方、経時的な膨張変形を伴う現象に対しては、時間依存する微小亀裂の伸長度を独自に導入し、空間的には三次元有限要素法を、時間進展には差分法を用いる数値解析手法を提案している。そして、既往の材料実験との対比を通し、その妥当性を確かめた上で、実践的なトンネル断面に対して、トンネル掘削時を始点とした経時シミュレーションを行っている。その結果、既往の事例に良好に対応し得る、トンネル側方下部より上方に経時的に進展・拡大するトンネル周辺地盤のせん断帯の形成が得られている。

以上のように、本論文で得られた成果は、山岳トンネルの掘削における地山のひずみ軟化挙動の評価手法として、その新規性と有用性は高く、トンネル工学の発展に寄与するところが大きい。従って、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格を有すると認める。